

STUDI MODEL BOLA EKSPLISIT DAN HOMOGEN DALAM PERHITUNGAN TERAS HTR PEBBLE BED

Zuhair

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN

ABSTRAK

STUDI MODEL BOLA EKSPLISIT DAN HOMOGEN DALAM PERHITUNGAN TERAS HTR PEBBLE BED. Beberapa negara sedang mengerjakan program riset dan pengembangan HTR secara ekstensif yang dipromosikan oleh keatraktifan konsep desain HTR dan kapabilitasnya yang unik dalam memproduksi hidrogen dan panas proses untuk aplikasi industri. Sifat khas dari geometri bahan bakar, moderator dan teras HTR temperatur tinggi mendorong berbagai pusat riset nuklir di dunia mengembangkan model khusus dan teknik komputasi yang diperlukan untuk desain dan analisis HTR *pebble bed*. Makalah ini menguji dan mendiskusikan model bola eksplisit dan homogen dalam perhitungan teras HTR *pebble bed* dengan program transport Monte Carlo MCNP5 dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI. Dalam model bola eksplisit, teras HTR *pebble bed* dideskripsikan secara detil dimana seluruh zona baik moderator *pebble*, gas helium maupun bahan bakar *pebble* dengan kernel, lapisan coating dan matriks grafit dimodelkan secara eksplisit. Dalam model homogen, HTR *pebble bed* dideskripsikan dengan menghomogenisasi moderator *pebble*, *shell* grafit, matriks grafit dan pendingin helium. Hasil perhitungan memperlihatkan model homogen menunjukkan konsistensi dengan prediksi kritikalitas teras (k_{eff}) di bawah estimasi model bola eksplisit untuk seluruh ketinggian teras yang dipertimbangkan dengan bias kurang dari 1,06%. Hasil ini menyimpulkan bahwa model homogen dapat diadopsi dalam perhitungan reaktor *pebble bed* karena tidak diperlukan koreksi untuk menghilangkan efek tepi sebagai konsekuensi dari teras yang dibentuk oleh *array* sel kisi heksagonal satuan partikel TRISO dalam ruang 3-D.

Kata-kunci: model bola eksplisit, model homogen, HTR *pebble bed*, MCNP5, ENDF/B-VI.

ABSTRACT

STUDY ON EXPLICIT BALL AND HOMOGENEOUS MODEL IN CORE CALCULATION OF HTR PEBBLE BED. Some countries are working on research and development program of HTR extensively promoted by attractiveness of HTR design concepts and its unique capabilities in producing hydrogen and process heat for industrial applications. Typical properties of fuel, moderator and high-temperature reactor core geometries encourage nuclear research centers in the world to develop specific models and computational techniques needed for the design and analysis of pebble bed reactor. This paper examines and discusses explicit ball and homogeneous model in HTR *pebble bed* core calculations with MCNP5 Monte Carlo transport code and the continuous energy nuclear data library ENDF/B-VI. In an explicit model of the ball, HTR *pebble bed* core is described in detail throughout the zone where moderator *pebble*, helium gas and fuel *pebble* with the kernel, a layer of graphite coating and matrix is modeled explicitly. In homogeneous model, HTR *pebble bed* core is described by homogenization of moderator *pebble*, graphite *shell*, graphite matrix and helium cooling. The calculation results show homogeneous model indicates consistency with the prediction of core criticality (k_{eff}) below the estimated explicit model of the ball for the entire height of the core considered with a bias of less than 1.06%. These results concluded that homogeneous model can be adopted in the calculation of *pebble bed* reactor because it is not necessary corrections to eliminate edge effects as a consequence of the core arranged by the array of TRISO particle unit cell hexagonal lattice in 3-D space.

Keywords: explicit ball model, homogeneous model, HTR *pebble bed*, MCNP5, ENDF/B-VI.

PENDAHULUAN

Reaktor temperatur tinggi (*high temperature reactor*, HTR) merupakan salah satu kandidat reaktor Generasi IV yang menjanjikan karena selain memenuhi kriteria karakteristik reaktor Generasi IV, HTR memiliki keselamatan melekat untuk seluruh kondisi kecelakaan yang mungkin terjadi. Konsep desain HTR didasarkan pada pemanfaatan teras *pebble bed* yang disebut HTR *pebble bed*, dan teras prismatik yang disebut HTR prismatik. Kedua

desain HTR ini dimoderasi oleh grafit dan dimuati oleh partikel bahan bakar TRISO. Partikel TRISO terdiri dari bahan bakar kernel yang dikelilingi oleh empat lapisan *coating* grafit yang diperlukan untuk menyediakan penahan produk fisi agar tidak terjadi kebocoran dan keluar dari matriks bahan bakar. Lapisan-lapisan grafit dipilih untuk efek moderasi neutron. Karena kapasitas panasnya yang besar, grafit sangat membantu mengurangi kenaikan temperatur bahan bakar dalam kasus kecelakaan

reaktor temperatur tinggi.

Beberapa negara sedang mengerjakan program riset dan pengembangan HTR secara ekstensif yang dipromosikan oleh keatraktifan konsep desain HTR dan kapabilitasnya yang unik dalam memproduksi hidrogen dan panas proses untuk aplikasi industri. Cina pada tahun 2005 telah memutuskan untuk meningkatkan teknologi HTR-10^[1] dengan merealisasikan proyek HTR-PM (*high temperature reactor-pebble bed modules*)^[2] yang konstruksinya telah dimulai tahun 2009 dan program komisioningnya direncanakan tahun 2013.

Inisiatif Afrika Selatan untuk mengembangkan PBMR (*pebble bed modular reactor*)^[3] dimulai tahun 1999 dan saat ini PBMR sedang direvisi karena beberapa alasan. Proyek NGNP (*next generation nuclear plant*)^[4] memperoleh mandat dari pemerintah USA tahun 2005 dan reaktor ini direncanakan akan mulai beroperasi tahun 2021. Jepang sedang mengerjakan riset dan pengembangan proyek GTHTR300C (*gas turbine high temperature reactor 300-cogeneration*)^[5] yang didedikasikan untuk kogenerasi listrik dan hidrogen dengan proses pemisahan air termo-kimia sulfur-iodin yang bebas gas emisi CO₂.

Korea tahun 2008 telah menyetujui program teknologi kunci untuk hidrogen nuklir dan proyek NHDD (*nuclear hydrogen development and demonstration*)^[6]. Proyek ini ditujukan untuk mendesain sistem produksi hidrogen nuklir yang konstruksi lengkapnya ditargetkan selesai tahun 2022 sedangkan demonstrasi protipenya tahun 2026. HTR-TN (*HTR technology network*) yang dibentuk oleh organisasi riset dan industri nuklir Eropa telah memberikan kontribusi yang konsisten untuk proyek reaktor berpendingin gas temperatur tinggi Generasi-IV dalam program RAPHAEL^[7].

Sifat khas dari geometri bahan bakar, moderator dan teras reaktor temperatur tinggi mendorong berbagai pusat riset nuklir di dunia

mengembangkan model dan teknik komputasi khusus yang diperlukan untuk desain dan analisis HTR *pebble bed*. Berbagai metode juga diinvestigasi untuk mendapatkan standard perhitungan reaktor yang paling akurat. Dalam makalah ini, studi model bola eksplisit dan homogen didiskusikan dan diuji dalam perhitungan teras reaktor *pebble bed*. Seluruh perhitungan dikerjakan dengan program transport Monte Carlo MCNP5^[8] dan komparasi hasil perhitungan kedua model kemudian dianalisis dengan memanfaatkan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI^[9].

DESKRIPSI HTR PEBBLE BED

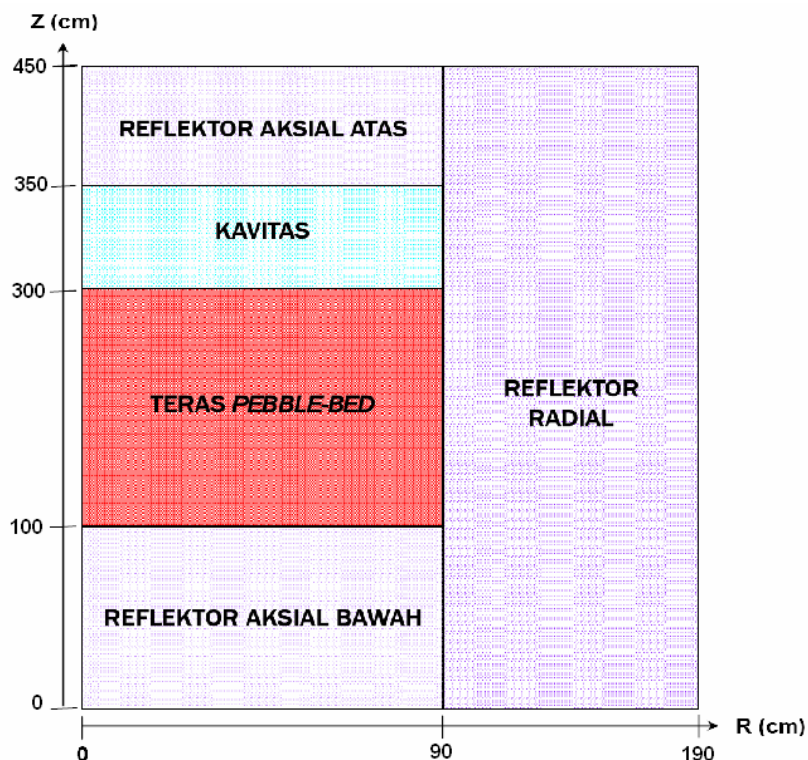
HTR *pebble bed* adalah reaktor nuklir berpendingin gas helium temperatur tinggi dengan moderator dan reflektor grafit. Selain berukuran kecil, bersifat modular dan keselamatan melekat, HTR *pebble bed* memiliki fleksibilitas dalam desain dan operasi serta kompetitif dengan pembangkit listrik berbahan bakar fosil. Reaktor ini dapat menggunakan bahan bakar dari material yang berbeda seperti thorium, plutonium, uranium alam dan uranium yang diperkaya^[10] tanpa modifikasi teras secara signifikan. Pemanfaatan bahan bakar MOX dalam HTR *pebble bed* juga sedang dikembangkan di berbagai negara maju dalam senyawa yang berbeda seperti karbida atau nitrida.

Dalam studi ini, bahan bakar UO₂ dipilih agar sesuai dengan yang digunakan dalam reaktor demonstrasi HTR-10 serta dalam desain reaktor *pebble bed* mutakhir HTR-PM Cina dan PBMR Afrika Selatan. Reaktor ini dimodelkan terdiri dari teras berbentuk silinder dengan kavitas sentral setebal 50 cm dan reflektor grafit yang mengelilingi teras dengan ketebalan 100 cm dalam arah aksial dan radial. Sebanyak 45.000 *pebble* yang terdiri dari bahan bakar *pebble* dengan radius 3 cm dan moderator *pebble* dengan radius yang sama menempati teras reaktor dengan densitas daya rendah. Densitas daya rendah dalam teras grafit

penuh mempersembahkan karakteristik keselamatan melekat sehingga temperatur puncak yang dicapai dalam kondisi kecelakaan apapun akan selalu berada di bawah temperatur leleh bahan bakar.

Setiap bahan bakar *pebble* mengandung ~9 g uranium dengan pengkayaan ^{235}U sebesar 8,2%. Bahan bakar *pebble* dan moderator *pebble* dalam teras dispesifikasikan dengan komposisi 2:1.

Pendingin helium mengalir diantara celah-celah bahan bakar *pebble* dan moderator *pebble* serta menempati rongga dengan volume 39% dari volume teras berdiameter 180 cm dan tinggi 200 cm. Skema geometrik 2-D R-Z model teras HTR *pebble bed* diperlihatkan dalam Gambar 1 dan karakteristik utama reaktor diberikan dalam Tabel 1.



Gambar 1. Skema geometrik model teras HTR *pebble bed*.

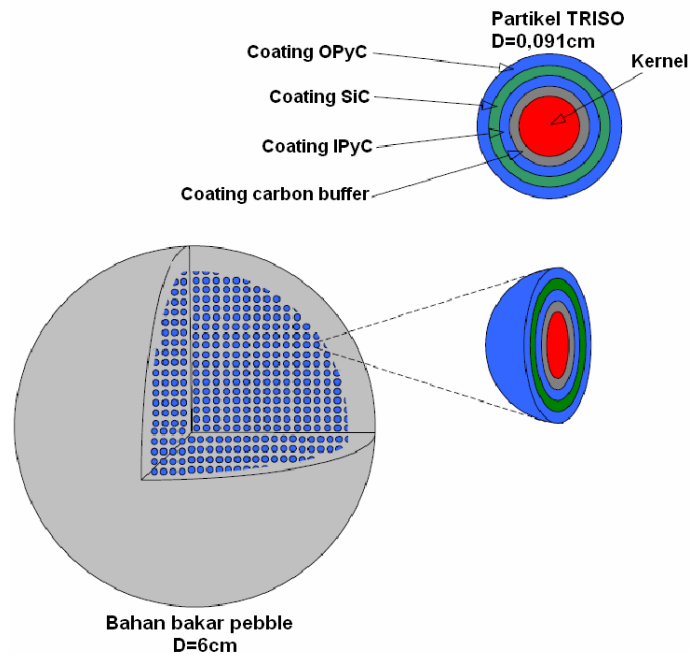
Tabel 1. Karakteristik utama HTR *pebble bed*.

Daya termal reaktor	10 MW
Tinggi teras reaktor	2 m
Diameter teras reaktor	1,8 m
Jumlah <i>pebble</i> dalam teras	45.000
Material bahan bakar	UO ₂
Massa uranium per <i>pebble</i>	9,13 g
Pengkayaan bahan bakar	8,2%
Volume teras aktif	~5 m ³
Densitas daya rerata	2 MW/m ³
Jumlah <i>pebble</i> per m ³	9000
Impuritas boron alam dalam reflektor grafit (ppm)	2

METODE DAN MODEL PERHITUNGAN

Pemodelan dengan MCNP5 membutuhkan deskripsi geometri, komposisi material dan tipe material yang digunakan. Pemodelan dimulai dari menspesifikasikan geometri bahan bakar *pebble*. Gambar 2 mengilustrasikan skema geometrik bahan bakar *pebble*. Bahan bakar *pebble* berbentuk bola

dengan diameter 6 cm. *Shell* dari *pebble* adalah lapisan grafit dengan ketebalan 0,5 cm. Didalam *shell* grafit, yang disebut sebagai zona bahan bakar, terdapat 15.000 partikel TRISO yang terdistribusi secara acak dalam matriks grafit. Setiap partikel TRISO terdiri dari bahan bakar kernel dan sistem *coating* TRISO.



Gambar 2. Skema geometrik bahan bakar *pebble*

Tabel 2. Spesifikasi bahan bakar *pebble* dan partikel TRISO.

Bahan bakar <i>pebble</i>	
Jumlah partikel TRISO per <i>pebble</i>	15.000
Diameter <i>pebble</i>	6 cm
Radius zona bahan bakar	2,5 cm
Ketebalan <i>shell</i> grafit dalam <i>pebble</i>	0,5 cm
Densitas <i>shell</i> grafit	1,75 g/cm ³
Impuritas boron alam dalam <i>shell</i> grafit	0,5 ppm
Massa bahan bakar UO ₂ per <i>pebble</i>	10,21 g
Fraksi <i>packing pebble</i>	61%
Partikel TRISO	
Diameter bahan bakar kernel	0,5 mm
Densitas UO ₂	10,4 g/cm ³
Densitas matriks grafit	1,75 g/cm ³
Impuritas boron alam dalam matriks grafit	0,5 ppm
Material lapisan <i>coating</i> (dari dalam ke luar)	C/C/SiC/C
Ketebalan lapisan <i>coating</i>	90/40/35/40 μm
Densitas material dalam lapisan <i>coating</i>	1,05/1,9/3,18/1,90 g/cm ³
Fraksi <i>packing</i> TRISO	9,043 %

Data spesifikasi bahan bakar *pebble* dan partikel TRISO disajikan dalam Tabel 2. *Coating* TRISO dibuat dari tiga lapisan karbon pirolitik, yakni penyangga karbon (*carbon buffer*), karbon pirolitik bagian dalam (IPyC, *inner pyrolytic carbon*) dan karbon pirolitik bagian luar (OPyC, *outer pyrolytic carbon*) serta satu lapisan silikon karbida (SiC). Setiap *coating* memiliki fungsi spesifik dan mempersembahkan penahan-diri untuk setiap partikel bahan bakar. *Coating* ini menjadi dasar keselamatan HTR *pebble bed* karena bertanggung-jawab menahan dan mengungkung semua produk fisi di dalam matriks bahan bakar.

Ada dua teknik pemodelan yang diterapkan untuk HTR *pebble bed*. Dalam metode pertama, teras HTR *pebble bed* dimodelkan secara detil dimana seluruh zona baik moderator *pebble*, gas helium maupun bahan bakar *pebble* dengan kernel, lapisan *coating* dan matriks grafit dimodelkan secara eksplisit. Dalam metode kedua, teras HTR *pebble bed* dimodelkan dengan menghomogenisasi moderator *pebble*, *shell* grafit, matriks grafit dan pendingin helium. Zona kernel dan lapisan *coating* tetap dimodelkan secara eksplisit. Kedua metode ini yang secara khusus memasukkan fitur heterogenitas ganda diidentifikasi sebagai model bola eksplisit dan model homogen. Model homogen merupakan simplifikasi model bola eksplisit^[11].

Model bola eksplisit

Model bola eksplisit adalah model yang representasinya paling detil untuk diimplementasikan dalam program MCNP5. Partikel TRISO dalam matriks grafit dimodelkan dengan kisi heksagonal seperti diperlihatkan dalam Gambar 3. Sel kisi satuan ini terdiri dari tiga zona: bahan bakar kernel, keempat lapisan *coating* TRISO dan matriks grafit.

Dimensi sel satuan untuk setiap zona diberikan dalam Tabel 3. Nilai *pitch* kisi sel satuan model eksplisit (p_{eks}) dihitung berdasarkan jumlah

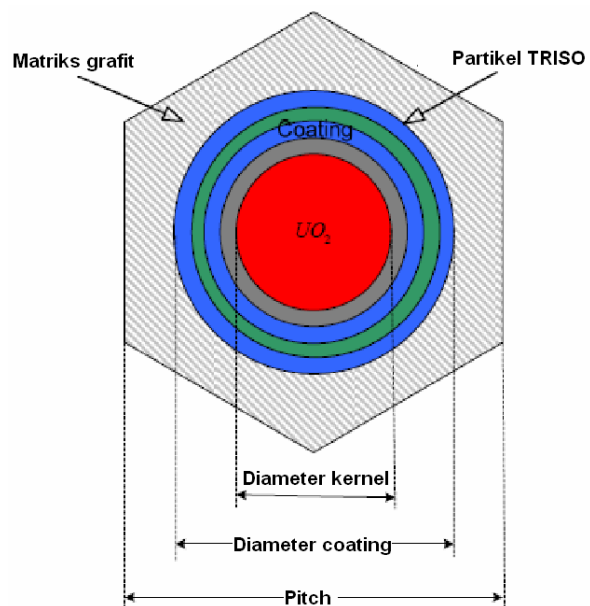
partikel per *pebble* dan spesifikasi geometri *pebble* mengikuti formula,

$$p_{eks} = R_f \times \sqrt[3]{\frac{8\sqrt{3}\pi}{9N}}$$

dimana N adalah jumlah partikel TRISO per *pebble* (= 15.000), R_f adalah radius zona bahan bakar dalam *pebble* (= 2,5 cm).

Tabel 3. Dimensi sel satuan model bola eksplisit.

Diameter bahan bakar kernel	0,050 cm
Diameter <i>coating carbon buffer</i>	0,068 cm
Diameter <i>coating</i> IPyC	0,076 cm
Diameter <i>coating</i> SiC	0,083 cm
Diameter <i>coating</i> OPyC	0,091 cm
<i>Pitch</i> kisi	0,171456 cm



Gambar 3. Sel kisi heksagonal model bola eksplisit.

Model eksak *pebble* dalam teras reaktor dapat didekati dengan struktur kisi *body-centered cubic* (BCC). Kisi BCC adalah kisi yang paling mudah untuk memodelkan teras yang dimuati bahan bakar *pebble* dan moderator *pebble* dengan komposisi jumlah 1:1 karena sel satuan kisi ini terdiri dari dua *pebble*, yaitu sebuah bahan bakar *pebble* di pusat kisi dan sebuah moderator *pebble* yang terbagi menjadi 1/8 bagian di setiap pojok kisi. Teras dengan komposisi jumlah bahan bakar *pebble* (F) dan moderator *pebble* (M) 2:1 dapat ditangani dengan kisi BCC namun dengan mereduksi radius moderator *pebble* (R_M) dari 3 cm menjadi 2,381102 cm dan sebagai konsekuensinya *pitch* kisi (p_{BCC}) harus disesuaikan dari 7,185259 cm menjadi 6,528241 cm untuk menjaga rasio moderasi tidak berubah. Kedua besaran ini diperoleh dari formula,

$$R_M = R_F \times \sqrt[3]{\frac{M}{F}}$$

$$p_{BCC} = R_F \times \sqrt[3]{\frac{4\pi}{3f} \left(1 + \frac{M}{F}\right)}$$

dimana R_F adalah radius bahan bakar *pebble* ($= 3,0$ cm) dan f adalah fraksi *packing pebble* ($= 0,61$). Radius bahan bakar *pebble* (R_F) dibuat tetap 3 cm untuk mempertahankan heterogenitas ganda yang mengkarakterisasi reaktor *pebble bed*.

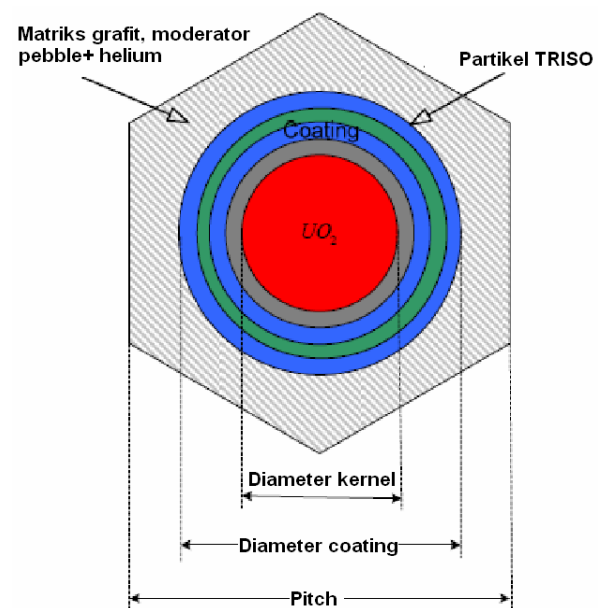
Model homogen

Dalam model homogen, teras HTR *pebble bed* digumpalkan ke dalam sebuah zona homogen. Hal ini secara virtual menghomogenisasi moderator *pebble*, *shell* grafit, matriks grafit dan pendingin helium dalam teras reaktor *pebble bed*. MCNP5 digunakan dalam mode serupa model *pebble* eksplisit dengan kisi heksagonal. Sel kisi juga terdiri dari tiga zona: kernel bahan bakar, keempat lapisan *coating* dan campuran homogen. Campuran homogen berisi fraksi matriks grafit partikel TRISO, *shell* grafit bahan bakar *pebble*, moderator *pebble* dan pendingin gas helium dalam teras. Dimensi sel

satuan ini diberikan dalam Tabel 4 dan Gambar 4.

Tabel 4. Dimensi sel satuan model homogen.

Diameter bahan bakar kernel	0,050 cm
Diameter <i>coating carbon buffer</i>	0,068 cm
Diameter <i>coating</i> IPyC	0,076 cm
Diameter <i>coating</i> SiC	0,083 cm
Diameter <i>coating</i> OPyC	0,091 cm
<i>Pitch</i> kisi	0,277708 cm



Gambar 4. Sel kisi heksagonal model homogen.

Nilai *pitch* kisi sel satuan model homogen (p_{hom}) dikalkulasi berdasarkan jumlah partikel TRISO per *pebble* (N), jumlah bahan bakar *pebble* (F) dan moderator *pebble* (M), fraksi *packing pebble* (f) dan geometri bahan bakar *pebble* mengikuti formula,

$$p_{hom} = R_F \times \sqrt[3]{\frac{8\sqrt{3}\pi}{9f \times N} \left(1 + \frac{M}{F}\right)}$$

Teras HTR *pebble bed* dimodelkan dengan fitur geometri berulang. Dalam model bola eksplisit, sel kisi satuan *pebble* BCC diekspansi ke seluruh volume teras sedangkan dalam model homogen, teras HTR *pebble bed* dibentuk oleh *array* dari sel kisi heksagonal satuan partikel TRISO dalam ruang 3-D. Komponen reaktor lainnya seperti reflektor

aksial dan radial dimodelkan dengan cara yang lebih mudah sesuai dengan dimensi dan komposisinya.

HASIL PERHITUNGAN DAN DISKUSI

Dalam simulasi MCNP5, waktu komputasi yang dibutuhkan untuk menghitung kritikalitas teras (k_{eff}) reaktor HTR *pebble bed* dengan 5.000 neutron per siklus dan *skipping* 10 siklus dari total 110 siklus adalah ~50 menit dengan komputer server Windows 2003, 16MB Ram CPU Quadcore. Sumber fisi awal ditempatkan dalam kernel bahan bakar dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI dimanfaatkan untuk seluruh perhitungan. Interaksi neutron termal dengan grafit yang terkandung dalam setiap material reaktor di bawah energi ~4 eV ditangani dengan data hamburan termal $S(\alpha, \beta)$ yang dispesifikasikan oleh graph.01t. Kondisi vakum dikerjakan pada batas luar dari sistem reaktor *pebble bed*.

Hasil perhitungan densitas atom model bola eksplisit dan model homogen disajikan dalam Tabel 5, 6 dan 7. Densitas campuran homogen diperoleh dengan mengalikan fraksi volume dengan densitas model bola eksplisit dan hasilnya kemudian dijumlahkan untuk setiap nuklida. Fraksi volume

moderator *pebble* (f_1), pendingin helium (f_2), *shell* grafit (f_3) dan matriks grafit (f_4) diperoleh dari hubungan,

$$f_1 = \frac{R_M^3}{R_F^3 + R_M^3 - N \times R_{\text{TRISO}}^3}$$

$$f_2 = \frac{(R_F^3 + R_M^3) \times \left(\frac{1}{f} - 1\right)}{R_F^3 + R_M^3 - N \times R_{\text{TRISO}}^3}$$

$$f_3 = \frac{R_F^3 - R_f^3}{R_F^3 + R_M^3 - N \times R_{\text{TRISO}}^3}$$

$$f_4 = \frac{R_f^3 - N \times R_{\text{TRISO}}^3}{R_F^3 + R_M^3 - N \times R_{\text{TRISO}}^3}$$

dimana R_{TRISO} adalah radius partikel bahan bakar TRISO (= 0,0455 cm). Hasil perhitungan densitas atom reflektor grafit HTR *pebble bed* diberikan dalam Tabel 8.

Tabel 5. Densitas atom partikel TRISO dalam model bola eksplisit (atom/barn-cm).

Nuklida	Kernel UO ₂	Lapisan <i>coating</i>		
		<i>Carbon buffer</i>	IPyC/OPyC	SiC
¹⁰ B	1,14694E-7	1,58108E-8	2,73095E-8	1,37780E-8
¹¹ B	4,64570E-7	6,40418E-8	1,10617E-7	5,58080E-8
Karbon	-	5,51511E-2	9,52609E-2	4,80603E-2
Silikon	-	-	-	4,80603E-2
Oksigen	4,64272E-2	-	-	-
²³⁵ U	1,92585E-3	-	-	-
²³⁸ U	2,12877E-2	-	-	-
Total	6,96413E-2	5,51512E-2	9,52610E-2	9,61207E-2

Tabel 6. Densitas atom matriks grafit, *shell* grafit, moderator *pebble* dan pendingin helium dalam model bola eksplisit (atom/barn-cm).

Nuklida	Matriks grafit kernel	Shell grafit <i>pebble</i>	Moderator <i>pebble</i>	Pendingin helium
¹⁰ B	9,64977E-9	9,64977E-9	3,97246E-8	-
¹¹ B	3,90864E-8	3,90864E-8	1,60905E-7	-
Karbon	8,77414E-2	8,77414E-2	9,03000E-2	-
³ He	-	-	-	3,71220E-11
⁴ He	-	-	-	2,65156E-5
Total	8,77414E-2	8,77414E-2	9,03002E-2	2,65156E-5

Tabel 7. Densitas atom partikel TRISO dan campuran homogen dalam model homogen (atom/barn-cm)

Nuklida	Kernel UO2	Lapisan <i>coating</i>			Campuran homogen
		Carbon <i>buffer</i>	IPyC/OPyC	SiC	
¹⁰ B	1,14694E-7	1,58108E-8	2,73095E-8	1,37780E-8	1,20527E-8
¹¹ B	4,64570E-7	6,40418E-8	1,10617E-7	5,58080E-8	4,48820E-8
Karbon	-	5,51511E-2	9,52609E-2	4,80603E-2	5,33097E-2
Silikon	-	-	-	4,80603E-2	-
Oksigen	4,64272E-2	-	-	-	-
³ He	-	-	-	-	1,47924E-11
⁴ He	-	-	-	-	1,05659E-5
²³⁵ U	1,92585E-3	-	-	-	-
²³⁸ U	2,12877E-2	-	-	-	-
Total	6,96413E-2	5,51512E-2	9,52610E-2	9,61207E-2	5,33204E-2

Tabel 8. Densitas atom reflektor grafit (atom/barn-cm)

Nuklida	Reflektor aksial	Reflektor radial
¹⁰ B	3,39617E-8	3,75250E-8
¹¹ B	1,37562E-7	1,51995E-7
Karbon	7,72000E-2	8,53000E-2
Total	7,72002E-2	8,53002E-2

Hasil perhitungan kritikalitas teras (k_{eff}) HTR *pebble bed* dirangkum dalam Tabel 9. Perhitungan dengan model homogen menunjukkan konsistensi dengan prediksi k_{eff} di bawah estimasi model bola eksplisit untuk seluruh ketinggian teras yang dipertimbangkan. Prediksi k_{eff} HTR *pebble bed* dengan model homogen yang lebih rendah daripada model bola eksplisit memberi kesan sebagai konsekuensi dari tidak terpotongnya (*unclipped*) bahan bakar *pebble* dan moderator *pebble* yang disusun dengan kisi BCC berulang di sekeliling dinding bagian dalam teras reaktor. Kontribusi *pebble* yang terpotong menyebabkan jumlah bahan

bakar *pebble* dan moderator *pebble* dalam teras bertambah. Kelebihan *pebble* ini, yang disebut efek tepi, secara tidak langsung mengakibatkan nilai k_{eff} bertambah walaupun tidak begitu signifikan. Namun jika diperlukan, untuk mendapatkan nilai kritikalitas yang lebih akurat, efek tepi harus dihilangkan dengan menerapkan koreksi yang mengeliminasi kelebihan *pebble* yang terpotong di sekeliling dinding teras. Secara keseluruhan, perhitungan MCNP5 dengan model homogen memperlihatkan kesesuaian yang sangat baik dengan model bola eksplisit dengan bias kurang dari 1,06%.

Tabel 9. Hasil perhitungan HTR *pebble bed* dengan MCNP5 dalam model bola eksplisit dan homogen.

Ketinggian teras HTR <i>pebble bed</i>	Faktor multiplikasi reaktor (k_{eff})		Bias perhitungan model homogen/ bola eksplisit
	Model bola eksplisit	Model homogen	
100	0,94375±0,00125	0,93373±0,00121	0,98938
110	0,97777±0,00124	0,97245±0,00120	0,99456
120	1,01026±0,00111	1,00728±0,00106	0,99705
130	1,03507±0,00110	1,03122±0,00128	0,99628
140	1,05184±0,00125	1,04737±0,00120	0,99575
150	1,07472±0,00131	1,07347±0,00114	0,99884
160	1,09216±0,00127	1,09110±0,00114	0,99903
170	1,10788±0,00116	1,10719±0,00108	0,99938
180	1,12160±0,00101	1,11930±0,00107	0,99795
190	1,13494±0,00121	1,13319±0,00114	0,99846
200	1,14841±0,00117	1,14490±0,00116	0,99694

KESIMPULAN

Studi model bola eksplisit dan homogen dalam perhitungan teras HTR *pebble bed* telah dilakukan dengan program transport Monte Carlo MCNP5 dan pustaka data nuklir energi kontinu ENDF/B-VI.

Dalam model bola eksplisit, teras HTR *pebble bed* dideskripsikan secara detil dimana seluruh zona baik moderator *pebble*, gas helium maupun bahan bakar *pebble* dengan kernel, lapisan *coating* dan matriks grafit dimodelkan secara eksplisit. Dalam model homogen, teras HTR *pebble bed* dideskripsikan dengan menghomogenisasi

moderator *pebble*, *shell* grafit, matriks grafit dan pendingin helium.

Hasil perhitungan memperlihatkan model homogen menunjukkan konsistensi dengan prediksi kritikalitas teras (k_{eff}) di bawah estimasi model bola eksplisit untuk seluruh ketinggian teras yang dipertimbangkan dengan bias kurang dari 1,06%. Hasil ini menyimpulkan bahwa model homogen dapat diadopsi dalam perhitungan reaktor *pebble bed* karena tidak diperlukan koreksi untuk menghilangkan efek tepi sebagai konsekuensi dari teras yang dibentuk oleh *array* sel kisi heksagonal satuan partikel TRISO dalam ruang 3-D.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih kami sampaikan kepada Dr. Ir. M. Dhandhang Purwadi yang memberikan inspirasi dan motivasi untuk melakukan riset ini. Dukungan dan saran yang amat berarti dari rekan-rekan Bidang Pengembangan Reaktor, sangat kami hargai.

DAFTAR PUSTAKA

1. Z. Wu, D. Lin, D. Zhong, "The Design Features of the HTR-10", Nuclear Engineering and Design, 218, pp. 25-32, 2002.
2. Z. Zhang, Z. Wu, *et al.*, Current Status and Technical Description of Chinese 22×250 MWth HTR-PM Demonstration Plant", Journal of Nuclear Engineering and Design, Vol. 239, Issue 7, July 2009.
3. M.R. Holbrook and T. Cook, "NRC Licensing Strategy Development for the NGNP", Proceedings of the 4-th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology HTR2008, Washington, DC (USA), 2008.
4. J. Kriek, "Status of the Pebble Bed Modular Reactor Project", Proceedings of the 4-th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology HTR2008, Washington, DC (USA), 2008.
5. K. Kunitomi, *et al.*, "JAEA's VHTR for Hydrogen and Electricity Cogeneration: GTHTR300C", Journal of Nuclear Engineering and Technology, Vol. 39, No. 1, February 2007.
6. J. Chang, "Status of Nuclear Hydrogen Production Technology Development Project in Korea", Proceedings of International Conference on Non-electrical Applications of Nuclear Power, Oarai, Japan, 2007.
7. V. Basini, *et al.*, "High-Temperature Reactor Fuel Technology in RAPHAEL European Project", Proceedings of the 4-th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology (HTR2008), Washington, D.C., USA, September 28 – October 1, 2008.
8. F.B. Brown, *et al.*, "MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code", Version 5, LA-UR-03-1987, April 24, 2003.
9. J.S. Hendricks, S.C. Frankle, J.D. Court, "ENDF/B-VI Data for MCNP", Los Alamos National Laboratory Report, LA-12891, 1994.
10. D. Greneche, "HTR Fuel Cycles: A Comprehensive Outlook of Past Experience and an Analysis of Future Options", ICAPP Conference, 2003.
11. M.L. Pritchard, "Neutronics Analysis of Pebble-Bed Cores with Transuranics", Master of Science thesis, Texas A&M University, December 2007